

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

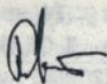
Институт технической теплофизики

На правах рукописи

КУДРИЦКИЙ Георгий Ростиславович

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОМПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА.

(05.14.06. - Техническая теплофизика)



А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

КИЕВ - 1995



00755721 (R)

- 2 -

AB 32.80-1
800

диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте технической теплофизики
Национальной Академии Наук Украины

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

ВЕЗРОДНЫЙ М.К.

доктор технических наук, академик
Инженерной академии Украины

КРАВЧЕНКО В.А.

доктор технических наук,
профессор

СМИРНОВ Г.Ф.

Ведущая организация: Институт прикладной физики АН Молдовы

Защита состоится "19" сентября 1995 г. в 14 часов на
заседании специализированного ученого совета Д 05.04.02 в
Институте технической теплофизики НАН Украины (252057, г.Киев,
ул.Желябова, 2-а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН Украины

Автореферат разослан " " 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор технических наук
ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Кривошея Ф.А.

Актуальность темы. Наблюдаемые в последние десятилетия высокие темпы развития микро- и оптоэлектроники, лазерной техники и основанных на них систем связи, локации, наведения требуют разработки более современных систем обеспечения теплового режима (СОТР). К числу основных тенденций при проектировании новой техники следует отнести стремление к автономизации и повышению мобильности. Следовательно, требованиям - миниатюрность, автономность, мобильность - должна отвечать и СОТР.

Эффективный путь решения проблемы охлаждения и термостабилизации устройства, обеспечивающий многократную интенсификацию теплоотдачи и отвечающий требованиям автономности и мобильности - реализация процесса парообразования на поверхности охлаждаемого элемента в условиях свободного движения теплоносителя. При этом используется свойственная этому процессу высокая интенсивность теплоотдачи при допустимых температурных режимах теплоотдающей поверхности. К достоинствам СОТР, реализующим кипение в условиях естественной конвекции, относится отсутствие сложной системы прокачки теплоносителя обязательной в СОТР с вынужденным движением охлаждающей жидкости.

При организации пузырькового кипения теплоносителя непосредственно на поверхности полупроводниковых приборов или теплонагруженных элементов твердотельных лазеров следует учитывать их макро- и микрогеометрические характеристики.

Микрогеометрия - шероховатость рассматриваемых объектов существенно меньше, чем у хорошо изученных "технически гладких" поверхностей, используемых в энергетическом и химико-технологическом оборудовании. Поэтому кипение происходит на поверхностях имеющих дефицит впадин - центров парообразования (ЦП).

Макрогеометрия - размеры объекта соизмеримы с линейными характеристиками, определяющими интенсивность теплообмена, т.е. существует зависимость $\alpha = f(D_0/d_0)$, $q_{кр} = f(Bo)$.

Последнее позволяет выделить поверхности, определяющий размер которых соизмерим с линейными характеристиками протекающего на них теплообменного процесса, в отдельный класс - поверхности малого размера (ПМР). Поверхность данного размера в зависимости от режимных параметров может относиться либо к протяженным, либо к ПМР. Так поверхность $d_0 = 25$ мм ($P = 0,1$ МПа) при кипении воды является протяженной, а при $P = 0,02$ МПа - ПМР.

Указанные факторы приводят к различиям в величине расчетных и экспериментальных значений α до 200%, а $q_{кр}$ до 500%.

т.е. невозможности использования зависимостей, полученных при кипении на "технически гладких" протяженных поверхностях для ПМР и поверхностей, имеющих дефицит ЦП. Это затрудняет проектирование и доводку новых типов теплообменного оборудования.

Весомый вклад в решение проблемы создания эффективных и компактных СОТР может внести использование научно-обоснованных и экспериментально проверенных методов интенсификации теплообмена, основанных на целенаправленном обеспечении условий теплообмена на поверхности и в тепловом пограничном слое.

При кипении для интенсификации теплообмена с успехом используется: искусственная турбулизация потока; нанесение на поверхность теплообмена покрытий из низкотеплопроводного или пористого материала; устройство неизотермического оребрения. Не все эти методы применимы для кипения в условиях естественной конвекции в большом объеме теплоносителя, тем более в специфических условиях ПМР. В первую очередь это относится к организации неизотермического оребрения из-за малых габаритов рассматриваемой теплообменной поверхности и в связи с тем, что ПМР представляет собой систему локально неизотермических участков. Невозможно применение методов, включающих вынужденное движение теплоносителя. Однако использующийся механизм улучшения поступления жидкости к поверхности нагрева может быть реализован в условиях большого объема за счет механического или вибрационного перемешивания теплоносителя. Очевидна перспективность использования в условиях ПМР пористых покрытий, однако специфичность условий протекания на ней процесса кипения не позволяет непосредственно переносить на ПМР результаты, полученные на протяженной поверхности.

Таким образом, исследование влияния микро- и макрогеометрии поверхности нагрева на механизм и интегральные характеристики процесса кипения и поиск путей управления теплоотдачей за счет целенаправленного воздействия на состояние теплового пристенного слоя жидкости актуальны как для теории теплообмена при кипении, так и для инженерной практики.

Цель работы. Исследовать локальные и интегральные характеристики процесса кипения в условиях определяющего влияния микро- и макрогеометрии поверхности на теплообмен и эффекты, возникающие в условиях целенаправленного воздействия на тепловой пограничный слой при нанесении на поверхность пористого покрытия или вибровоздействии на теплоноситель. Разработка мето-

дов расчета теплообмена и кризиса теплоотдачи при кипении с учетом влияния режимных параметров и геометрических характеристик поверхности.

Задачи исследования.

1. На основе представлений об определяющей роли внутренних характеристик в теплообмене при кипении разработать физическую модель влияния микро- и макрогеометрии поверхности на процесс.

2. Экспериментально исследовать влияние геометрических характеристик и формы поверхности нагрева на локальные и интегральные характеристики процесса кипения. На основе разработанной модели получить зависимости для определения интенсивности теплоотдачи, перегревов начала кипения и критических плотностей теплового потока учитывающие размеры и шероховатость теплообменной поверхности.

3. Экспериментально исследовать теплообмен при кипении на ПМР в условиях целенаправленного воздействия на тепловой пограничный слой. При этом изучить:

- влияние сетчатого КПП и вибровоздействия на механизм процесса кипения, его локальные и интегральные характеристики;
- влияние толщины слоя жидкости над поверхностью, высоты капиллярного поднятия жидкости, геометрических параметров покрытия и поверхности на интегральные характеристики кипения;
- резонансные эффекты в системе "жидкость-пар" при неподвижной поверхности нагрева и колебаниях объема жидкости или возбуждений колебаний в жидкости независимыми жесткими индукторами различной формы, работающими в режиме виброперемешивания.

По результатам экспериментального исследования предложить:

- физическую модель воздействия КПП на механизм теплообмена;
- соотношения для определения - перегрева начала кипения; интенсивности теплоотдачи; критических плотностей тепловых потоков; оптимальных, с точки зрения теплообмена, размеров сетчатого КПП при кипении на ПМР;
- методы интенсификации и управления теплоотдачей за счет внешних управляемых вибрационных воздействий.

Методика, аппаратура и объекты исследования. Экспериментальные исследования теплообмена при кипении на ПМР с различной шероховатостью проводились на установках ИТФ НАН Украины. Установки имели характерные особенности в зависимости от конкретных задач исследования.

Тепловые потоки (до $2,5 \text{ МВт/м}^2$) создавались с помощью те-

плового клина (диаметр торца на котором реализовалось кипение составлял - 0,5; 1,1; 2,5; 18,0; 28,0 мм) или непосредственным электрообогревом объекта исследования (цилиндрические трубки диаметром 3,0; 6,0; 10,0 мм). Шероховатость поверхности контролировалась микроскопом МИС-IIA и составляла Rz от 0,4 до 40 мкм. В качестве рабочих использовались жидкости с существенно различающимися теплофизическими свойствами (вода, этанол, ацетон, CCl_4 , фреон-II3, бензол) в диапазоне давлений $P/P_{кр}$ от $2 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-1}$. КПП выполнялись из 1...5 слоев стандартных сеток саржевого плетения с размером ячейки в свету от 0,2 до 2,5 мм не скрепленных с поверхностью нагрева. Выбор сетчатого покрытия обусловлен наличием промышленной технологии его изготовления, высокой повторяемостью его капиллярных характеристик и их соответствии условиям работы СОТР в широком диапазоне режимных параметров.

Температуры измерялись с помощью термопар, подключенных к милливольтметру Ш680003. Давление измерялось манометрами типа МО. Визуализация процесса кипения осуществлялась с использованием скоростной кинокамеры СКС-IM-16, телевизионной установки ПТУ-57 и строботачометра СТ-5. Колебания возбуждались электродинамическим стендом ВЭДС-10А.

Достоверность полученных результатов основывалась на использовании общепринятых методик и сравнении полученных результатов с данными других исследований.

Научная новизна.

1. Предложена не противоречащая экспериментальным результатам новая физическая модель роста парового пузыря после испарения микрослоя, позволившая объяснить особенности кипения на ПМР и поверхностях, имеющих дефицит центров парообразования.

Представляя шероховатость поверхности в виде системы открытых капиллярных каналов, размеры которых определяются обработкой поверхности, и полагая, что испарение жидкости внутри пузыря происходит на границе сухого пятна в его основании, удалось объяснить зависимость $\alpha = f(Rz)$ при кипении.

Модель предполагает существование предельного уровня шероховатости $Rz_{кр} = f[(\rho_{ж} - \rho_{п})/\rho_{п}]$ (обнаружен в экспериментах), превышение которого приводит к исчезновению влияния обработки на α и $q_{кр}$. Модель позволила учесть особенности теплообмена при кипении на поверхностях с $Rz < Rz_{кр}$ и получить расчетные зависимости для обобщения данных по α и $q_{кр}$ при кипении на

ПМР и протяженных поверхностях с различной геометрией.

2. Впервые экспериментально изучено влияние макрогеометрии поверхности на теплообмен при кипении в диапазоне тепловых потоков от начала генерации ПП до существования стабильной паровой пленки. Выявлены существенные отличия кривой $\alpha(q)$ при кипении на ПМР от наблюдаемой на протяженной поверхности и установлено существование характерных участков кривой кипения обусловленных работой одиночного ПП, ансамбля ПП, формированием нестабильной и стабильной паровой пленки на поверхности.

Показано, что интенсивность теплоотдачи в условиях ПМР зависит от соотношения характерного размера ПМР и отрывающегося от нее парового пузыря $\alpha = f(d_0/D_0)$. Установлен предельный уровень интенсификации ($\alpha_{\max} = 2\alpha$) теплообмена при кипении в условиях естественной конвекции в большом объеме.

Определены границы $0,1 < d_0/[\sigma/g(\rho_* - \rho_{\text{п}})]^{0,5} < 10$ влияния размеров поверхности на теплообмен и предложены расчетные зависимости, удовлетворительно обобщающие опытные данные по α и $q_{\text{кр}}$, учитывающие макрогеометрию поверхности.

3. Исследовано влияние сетчатого КПП на кипение в условиях свободного движения и капиллярной подпитки на ПМР. Установлены причины уменьшения перегревов начала кипения (ΔT_0) - увеличение толщины теплового пограничного слоя и показано, что рост интенсивности теплообмена на ПМР с КПП связан с изменением циркуляции жидкости и капиллярными эффектами на границе раздела фаз, приводящими к соответствующему изменению внутренних и интегральных характеристик процесса. Обнаружено и объяснено в рамках указанной выше модели уменьшение влияния шероховатости поверхности на теплообмен при кипении на ПМР с КПП.

Предложены зависимости для определения перегрева начала кипения, интенсивности теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении на ПМР с КПП, обобщающие опытные данные полученные на протяженных поверхностях. Определены оптимальные, с точки зрения теплоотдачи, геометрические характеристики сетчатого КПП.

Установлено, что в условиях капиллярной подпитки парообразование отличается от пузырькового кипения с присущим ему циклом роста и отрыва пузыря.

4. Впервые экспериментально исследован теплообмен при кипении в условиях вибрационного перемешивания жидкости независимыми жесткими индукторами колебаний, имеющими внутреннюю полость.

Установлено, что наиболее значительное воздействие на теплообмен при кипении на ПМР наблюдается при совпадении частот вибровоздействия и генерации паровых пузырей. Обнаружено существование резонансных эффектов в системе "жидкость-пар" в отсутствии колебаний и автоколебаний поверхности нагрева. Исследовано воздействие сжимаемого объема (паровой фазы) в полости индуктора на его рабочие характеристики.

Впервые обнаружена возможность управления теплоотдачей при кипении на поверхностях с $Rz < Rz_{пр}$ за счет целенаправленного изменения частоты вибровоздействия. Показано, что величина α при кипении в условиях вибровоздействия обусловлена ростом капиллярных напоров развиваемых микроструктурой поверхности в условиях низкочастотных колебаний.

Практическая значимость и реализация результатов. Предложенные в диссертации зависимости для определения интенсивности теплоотдачи и кризиса теплообмена при кипении, учитывающие геометрию поверхности, повышают надежность и точность тепловых расчетов испарительных СОР, а так же устройств энергетического и химико-технологического оборудования, работающего в условиях определяющего влияния указанных факторов.

Установленные в работе области влияния размеров и шероховатости поверхности на теплообмен, область интенсификации теплоотдачи при кипении на ПМР и ее предельный уровень, оптимальные геометрические характеристики сеччатого КПП, позволяют проводить прогнозный анализ условий работы оборудования, выбирать оптимальные режимные параметры его работы, повышать теплонапряженность поверхностей теплообмена и надежность их работы, снижать массогабаритные показатели СОР и в целом изделия.

По результатам исследований разработан новый тип локальнонеизотермических поверхностей нагрева (защитены 12 авторскими свидетельствами), позволивших создать СОР для радиоэлектронного оборудования наземного действия стационарного (НПО им. Коминтерна) и подвижного (Воронежский НИИ связи) базирования, а так же бортового радиокомплекса (Московский НИИ радиосвязи) космического базирования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на Международных конференциях - IV, VI, VII по Тепловым трубам (Лондон 1982, Гренобль 1987, Минск 1990); I, II Международный форум по тепломассообмену (Минск 1988, 1992); II, III Международный симпозиум по теплообмену (Пекин 1988, 1992);

на Всесоюзных конференциях - I, II Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации (Рига 1982, 1988); Теплообмен - VII (Минск 1984); VII, VIII Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах (Ленинград 1985, 1990); VII Опыт эксплуатации и пути совершенствования теплообменного оборудования (Севастополь, 1991); Металло- и энергосберегающая технология термической обработки (Москва, 1990).

Личный вклад автора. Предложена модель влияния геометрических характеристик поверхности нагрева на теплообмен при кипении. Получены зависимости для расчета интенсивности и кризиса теплообмена при кипении на ПМР с сетчатым КПИ и без него, а так же обосновывающие их экспериментальные данные. Соотношения для учета влияния шероховатости на интенсивность и кризис теплообмена при кипении на ПМР и протяженных поверхностях. Физические представления о механизме влияния внешних вибрационных воздействий на процесс кипения.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 82 научных работы, в том числе 32 изобретения. Основное содержание работы опубликовано в 22 статьях и 19 авторских свидетельствах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 181 источник. Диссертация изложена на 212 страницах машинописного текста, содержит 176 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и целесообразность исследования теплообмена при кипении в условиях определяющего влияния микро- и макрогеометрии поверхности нагрева, а так же интенсификации теплоотдачи путем целенаправленного воздействия на условия формирования теплового пограничного слоя.

Дано определение понятий микро- и макрогеометрия, поверхность малого размера. Отмечается, что отсутствуют четкие физические представления о механизме влияния указанных факторов на теплообмен и расчетные зависимости для определения интегральных характеристик процесса, а имеющиеся экспериментальные результаты носят фрагментарный характер.

Обоснован выбор методов интенсификации теплообмена, сформулированы цель и задачи исследования, кратко изложены результаты, которые выносятся на защиту.

В первой главе диссертации выполнен обзор и анализ работ, посвященных современному состоянию исследований влияния мик-

ро-и макрогеометрии поверхности и условий формирования теплового пограничного слоя на теплообмен при кипении. Основное внимание обращено на:

- Модельные представления об образовании паровых зародышей на поверхности нагрева и их связи с ее микрогеометрией. Отмечено, что наиболее разработаны и физичны модели В.М.Присяжкова и И.З.Коппа в которых при аналитическом описании поверхности использован теоретико-вероятностный подход и учитывается объемная структура шероховатости. Однако, зависимости для определения интенсивности теплообмена, предложенные в рамках указанных моделей, основанные на зависимости плотности ЦП от шероховатости, весьма громоздки и обладают недостаточной точностью.

- Работы, посвященные теплообмену и кризису теплоотдачи при кипении в условиях влияния микрогеометрии поверхности на теплообмен. Установлено, что результаты исследований весьма ограничены и противоречивы, последнее связано с отсутствием учета предельного уровня шероховатости поверхности на теплообмен. Проблемы, связанные с кризисом теплообмена, относятся к числу наименее изученных. Имеющиеся расчетные зависимости носят эмпирический характер и не могут быть распространены на условия существенно отличные от тех, в которых они получены.

- Процесс парообразования на ПМР. Установлены причины-условия формирования теплового пограничного слоя, зависимость локальных характеристик процесса и температурного режима поверхности от размера нагревателя, по которым использование зависимостей для определения α и $q_{кр}$ при кипении на протяженных поверхностях недопустимо для ПМР. Указывается на недостаточную изученность кипения на ПМР. За исключением работ В.К.Щербакова-Ю.В.Кравца, интегральные характеристики теплообмена на ПМР не изучались.

- Интенсификацию теплообмена при кипении за счет нанесения на поверхность КПП. Отмечен существенный вклад Антоненко В.А., Ковалева С.А., Смирнова Г.Ф. в разработку теоретических представлений и расчетных зависимостей при парообразовании на поверхностях с КПП. Выделены вопросы механизма теплообмена, требующие дополнительных исследований. Указано, что в силу особенностей, присущих ПМР, непосредственное перенесение на нее представлений, полученных при кипении на протяженных поверхностях, не всегда возможно.

- Теплообмен при кипении в условиях вибрационного воздействия на поверхность и теплоноситель. Сделан вывод об определя-

щем влиянии резонансных эффектов в системе "жидкость-пар" на интенсивность теплоотдачи. Отмечено, что в большинстве исследований использовался метод наложения колебаний на нагретое тело или рабочую камеру, что технически сложно и требует значительных энергозатрат.

Сформулированы выводы с целью выделения аспектов кипения на ПМР, требующих дополнительного изучения. Перечислены задачи исследования, обоснована методика экспериментов.

Вторая глава диссертации посвящена изложению физической модели влияния шероховатости и размеров поверхности нагрева на процесс кипения. В модели принято, что интегральные характеристики кипения определяются условиями зарождения, роста и отрыва парового пузыря, т.е. внутренними характеристиками процесса. В течение каждого цикла образования пузырей тепловой поток с поверхности стенки распределяется на: отводимый за время ожидания парового пузыря, и отведенный за время его роста.

В период роста парового пузыря имеют место два механизма отвода теплоты: испарение жидкости из микрослоя - краткий, но интенсивный период теплоотвода; продолжительный период роста пузыря без микрослоя. Рост пузыря при испарении микрослоя изучен в работах В.М. Толубинского и Д.А. Лабунцова, в то же время, условиям роста пузыря без микрослоя внимание не уделялось, не рассматривалось и влияние поверхностных условий на формирование микрослоя, хотя его толщина соизмерима с высотой неровностей поверхности. Поскольку при росте без микрослоя маловероятно испарение жидкости в III с его наружной поверхности или передача теплоты от поверхности к паровому объему, то можно предположить, что рост пузыря в этом режиме осуществляется за счет испарения жидкости на границе сухого пятна в его основании, которое стремится к своему равновесному состоянию, а подток жидкости к границе сухого пятна происходит по капиллярным каналам, образованным микрошероховатостью поверхности.

Для математического описания шероховатости в виде организованной капиллярной структуры на основании топологического анализа микрогеометрии поверхности была выбрана модель выступов в виде усеченных четырехгранных пирамид. Следовательно, микрошероховатость представляет собой: микровыступы - усеченные пирамиды, в горизонтальном сечении которых лежат квадраты, а в вертикальном - равнобедренные трапеции с высотой от 0 до $h_{\max}$ и постоянными углами при основании; микровпадины - кана-

вки треугольного сечения с углом при вершине впадины 2γ ; число микровпадин равно числу микровыступов.

Закон распределения высот микровыступов для широкого класса поверхностей с различной обработкой имеет вид

$$f(h) = C h^2 \exp(-h/\sigma)^2 \quad (1)$$

Тогда, принимая среднюю высоту трапециевидных выступов равной $h_{op} = 2R\sigma$ и используя подход, предложенный В.Ф.Присняковым, можно определить среднюю площадь основания микровыступов, соответственно, и их число ($1/n = F_{op}$).

$$F_{op} = 0,250\sigma^2 \operatorname{tg} \gamma [1/(1-k_p)] (3\kappa^3 \operatorname{erf}(h_m/\sigma) - 2h_m e^{-(h_m/\sigma)^2} (2h_m + 3\sigma^2))$$

где $C = 4(\kappa^3)^{-0,5}$; $\sigma = 1,99 R_p h_{op}$.

Рассматриваемая структура шероховатости представляет систему пересекающихся открытых треугольных канавок (рис.1). При этом число канавок, участвующих в теплообмене является функцией обработки и размеров зоны контакта пузыря с поверхностью

$$N = (\pi n)^{0,5} R_{кан} - 4 \quad (2)$$

Тогда количество теплоты, которое может быть отведено данной структурой:

$$Q = \kappa \rho_{ж} R_{эф}^4 N / 4 R_{кан} l \quad (3)$$

где l - расстояние между сухой точкой, где кривизна мениска наибольшая ($\cos \gamma / S_{min}$) и мокрой, где она наименьшая ($\cos \gamma / S_0$); $R_{кан}$ - капиллярный радиус, равный $S_0 / \cos \alpha$; $R_{эф}$ - эффективный радиус канавки, равный (с учетом кривизны мениска)

$$R_{эф} = (S_0 / 2 \cos \gamma) (2 \cos^2 \gamma - \operatorname{tg} \gamma ((\pi - 2\gamma) - \sin 2\gamma))$$

Условия работы рассматриваемых капиллярных канавок имеют ряд особенностей. Так за пределами сухого пятна (зоны контакта) в основании III канавки затоплены жидкостью, т.е. мениск в сечении I плоский. Расстояние (X_0) до сечения 2, на котором кривизна мениска равна $\cos \gamma / S_0$, может быть найдено из отношения плотностей теплового потока, отведенных на участках от X_0 до X_{max} и от 0 до X_0 . Воспользовавшись рекомендациями Морица, и предполагая, что изменение капиллярного давления и гидравлического сопротивления в любом сечении потока жидкости равны $dP_{кан} / dS = dP / dx$, а массовый расход жидкости в любом сечении канавки на участке от $X = X_0$ до $X = X_0 + x$

$$m(x) = m_0 (1 - (X_0 + x) / (X_0 + X_{max}))$$

где m_0 - массовый расход в точке $X = X_0$ равен $2qS_0(X_0 + X_{max})/r$ была определена максимальная плотность теплового потока, отво-

димого канавкой на участке от X_0 до $X_{\max}$.

$$q_{\max} = \frac{(S_{\min}^3 - S_0^3) / r_{\text{р}} \sigma \cos \theta}{S_0 (X_{\max} - X_0)^2 \mu_{\text{ж}}} \frac{2 \cos^2 \gamma - \operatorname{tg} \gamma [(\pi - 2\gamma) - \sin 2\gamma]^3}{24 \sin 2\gamma \cos 2\gamma} \quad (4)$$

Затем, исходя из тех же предпосылок, была найдена величина q_{X_0} и получена зависимость для определения X_0 в виде

$$\frac{(X_{\max} - X_0)^2}{X_0 (X_{\max} - 0,5 X_0)} = 5,33 \operatorname{tg} \gamma \frac{(2 \cos^2 \gamma - \operatorname{tg} \gamma [(\pi - 2\gamma) - \sin 2\gamma])^3}{(2 \cos^2 \gamma + \operatorname{tg} \gamma [2 \cos^2 \gamma - \operatorname{tg} \gamma ((\pi - 2\gamma) - \sin 2\gamma)])}$$

Таким образом, при расчете тепловых потоков, отводимых КС шероховатости (3) $l = (X_{\max} - X_0 - S_{\min})$, где $X_{\max} = R_z \operatorname{tg} \gamma (1 + k_p) / (1 - k_p)$; $S_{\min}$ - половина наименьшей смоченной ширины канавки, капиллярная разность давлений которой равна импульсу давления парового потока, проходящего через границу раздела фаз.

В общем случае, для данного значения q на любом участке периметра сухого пятна должно испаряться одинаковое количество жидкости. Плотность теплового потока, отнесенная к площади поверхности раздела фаз увеличивается с ростом X . Поэтому может существовать некоторое предельное сечение, в котором импульс давления парового потока, проходящего через поверхность раздела фаз становится больше капиллярной разности давлений. Следовательно, жидкость в данном сечении потока выдавливается из канавки. На этом основании была определена наименьшая смоченная ширина канавки. Импульс сил давления можно записать в виде $P_1 = \rho_{\text{п}} W^2$, где W - скорость парообразования.

$$W = 2q S_0 (X_{\max} + X_0) / r_{\text{р}} S(x) [(\pi - 2\gamma) / \cos \gamma] X_{\max}$$

Критическая точка, в которой может произойти осушение канавки, имеет место при $x = X_{\max}$, так как P_1 изменяется пропорционально квадрату $S(x)$, а $\Delta P_{\text{кап}}$ - в первой степени. Из условия их равенства

$$S_{\min} = \frac{2q^2 S_0^2 (X_{\max} + X_0)^2}{\rho_{\text{п}} r^2 \sigma X_{\max}^2} \frac{\cos \gamma}{(\pi - 2\gamma)^2} \quad (5)$$

На рис. 2 приведена зависимость минимальной $q_{\min}$ (при которой $S_{\min}$ может не учитываться) и максимальной $q_{\max}$ (при которой происходит срыв потока) плотности теплового потока от шероховатости поверхности. При этом принято (согласно (4)), что в случае $S_{\min}^3 / S_0^3 < 10^{-2}$ величиной $S_{\min}$ можно пренебречь, а при $S_{\min}^3 / S_0^3 > 1$ происходит осушение канавки.

На рис. 3 приведены массовые расходы жидкости, обеспечиваемые КС шероховатости поверхности, рассчитанные по (3). Расче-

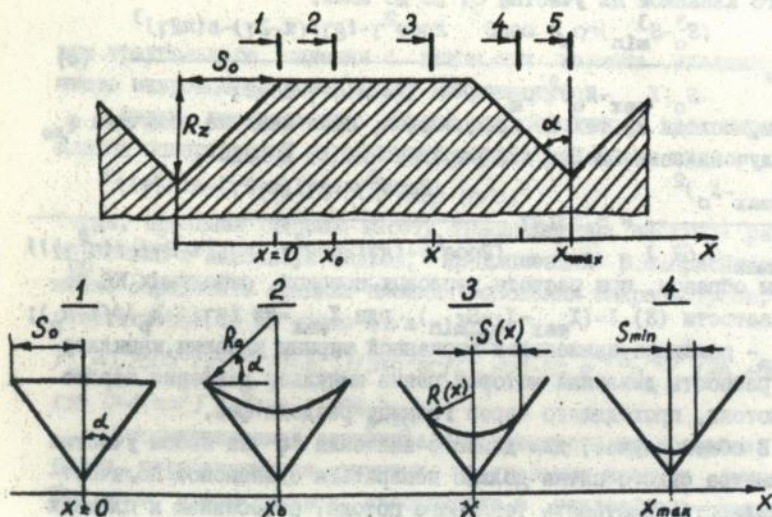


Рис.1. Схема капиллярной структуры микрорельефа поверхности нагрева и эволюции мениска по длине канавки.

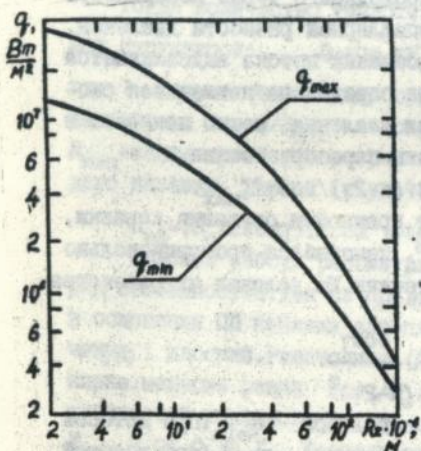


Рис.2. Плотность теплового потока при котором происходит осушение канавок за счет импульса давления парового потока (q_{max}), расчет по (4,5).

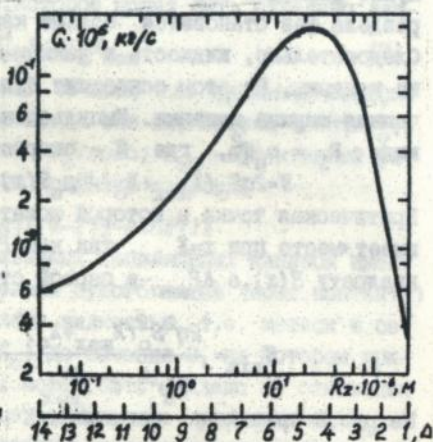


Рис.3. Массовый расход жидкости, обеспечиваемый капиллярной структурой микрорельефа поверхности, расчет по (3).

ты выполнялись для случая испарения воды при атмосферном давлении и $R_{\text{кр}} = 1 \text{ мм}$ (см. (2)). Как видно, кривая имеет ярко выраженный максимум, т.е. модель предполагает существование предельного уровня шероховатости $Rz_{\text{пр}}$, при котором достигаются максимальные значения α при кипении.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования закономерностей процесса кипения на ПМР без покрытия с различными видами обработки. Приведено описание рабочего участка и методики проведения опытов.

Установлено, что вид кривой $\alpha(q)$ при кипении на ПМР существенно отличается от наблюдаемой на протяженной поверхности (рис. 4). Это связано с интенсивной однофазной конвекцией разрушающей тепловой пограничный слой, что ведет к затягиванию начала кипения на ПМР. Величину перегревов $\Delta T_0^{\text{м}}$ можно оценить эмпирической зависимостью

$$\Delta T_0^{\text{м}} = II \left(d_0 / [\sigma / g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})]^{0.5} \right)^{-0.4} \quad (6)$$

На рис. 5 приведены наиболее типичные для ПМР кривые изменения α , среднестатистической величины пульсаций температуры поверхности и ее частоты с ростом q . Кривые в общем случае имеют ряд ярко выраженных участков, связанных с работой одного (I) и нескольких (II) ЦП, предельным насыщением поверхности (III) ЦП, образованием нестабильных (IV) и стабильных (V) паровых пленок. Проведен анализ общего вида кривой $\alpha(q)$ и влияние на него размеров и шероховатости поверхности, давления и рода жидкости. Отмечено, что влияние указанных факторов проявляется через изменение протяженности различных участков кривой. В дальнейшем подробно рассмотрен каждый из пяти участков.

Участок I (режим "единичного" центра). На протяженной поверхности ЦП возникают и растут в пристенном слое жидкости, толщина которого не зависит от геометрических размеров нагревателя. Кроме того, рост пузырей происходит в условиях взаимного влияния (теплого, турбулентного, акустического) действующих ЦП. На ПМР в режиме единичного центра такие взаимодействия отсутствуют. Практически вся теплота, подводимая к ПМР, воспринимается жидкостью и отводится с ЦП. Однако механизм переноса теплоты в различных стадиях цикла роста ЦП различен.

Наиболее интенсивно теплота отводится от поверхности в период испарения микрослоя (1-3 мс), при этом наблюдается резкое снижение температуры. Длительность периода испарения микрослоя зависит от соотношения размеров участка и растущего на

ней III (рис.6). Уменьшение соотношения d_0/D_0 ведет к сокращению времени испарения микрослоя, а вклад теплоты, отводимой в этот период в общий теплоотвод возрастает. Во второй стадии наблюдается рост температуры поверхности. Резкий переход от первой стадии ко второй соответствует высыханию микрослоя. Высыхание микрослоя происходит не сразу по всей поверхности, граница сухого пятна (СП) перемещается от центра к периферии основания III, скорость его роста замедляется, а подвод теплоты осуществляется частично за счет испарения микрослоя, и испарения жидкости, поступающей к границе СП по капиллярным каналам микроструктуры поверхности. Для кипения на ПМР с $d_0 < D_{\text{кп}}$ характерна низкая интенсивность теплоотдачи (до 90% теплоты отводится испарением микрослоя), форма пузыря сильно отличается от сферической. С ростом $\Delta T_{\text{в}}$ и уменьшением d_0 наблюдается сплющивание III, а его форма приближается к той, которую он имел бы при чисто инерционной схеме расширения - полусфере.

При кипении на ПМР с $d_0 > D_{\text{кп}}$ количество теплоты, отданное в паровой пузырь после испарения микрослоя составляет ~50%, при этом капиллярного напора, развиваемого микроструктурой шероховатости, достаточно для подвода к границе СП жидкости в количествах, обеспечивающих рост III (рис.7).

С ростом q доля теплоты, отводимая за счет испарения микрослоя, уменьшается, а за счет испарения из КС микрошероховатости возрастает. Когда отношение $\Delta Q/Q_{\text{кп}}$ во второй стадии роста приближается к единице на поверхности нагрева происходит активация новых ЦП. Влияние шероховатости в режиме "единичного" центра проявляется через рост перегрева необходимого для активации ЦП и снижение капиллярных эффектов в его основании, что в совокупности ведет к росту D_0 и снижению α .

Участок III (режим "сухого пятна"). Данный участок представляет значительный интерес с точки зрения формирования и развития паровых пленок на поверхности нагрева. В этом режиме на поверхности постоянно существует СП с размерами $D_{\text{кп}} < d_0$. Подвод жидкости на испарение осуществляется по периметру СП за счет капиллярных сил, при этом на границе рабочего участка сохраняется режим пузырькового кипения. III, возникающие на границе обогреваемого участка и СП имеют внутренние характеристики существенно отличные от наблюдаемых в режиме "единичного" центра. Эти отличия обусловлены существенной неравномерностью теплоподвода к III, растущему в тонком кольцевом слое, ограничен-

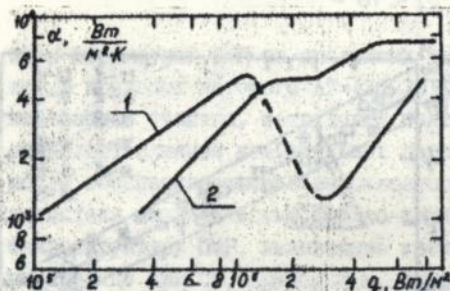


Рис.4. Вид кривой кипения на протяженной поверхности (1) и ПМР (2).

Рис.5. Режимы кипения на ПМР ($d_0 = 1,15$ мм).
1 - α ; 2 - A_t ; 3 - U .
 α - вода; σ - этанол.

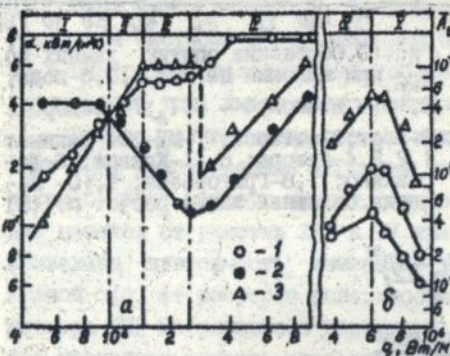


Рис.6. Влияние размеров нагревателя на длительность периода испарения микрослоя (τ^*) за время роста (τ_1) ПП. 1,2,3 - $d_0 = 0,5; 1,15; 2,5$ мм.

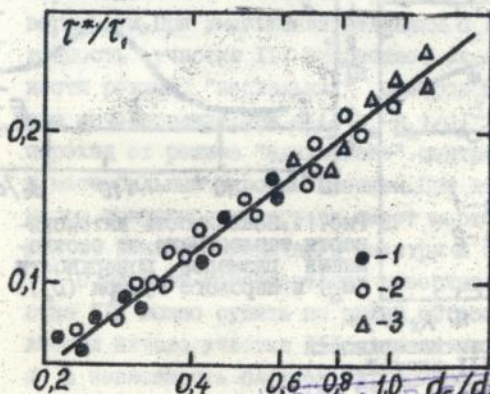
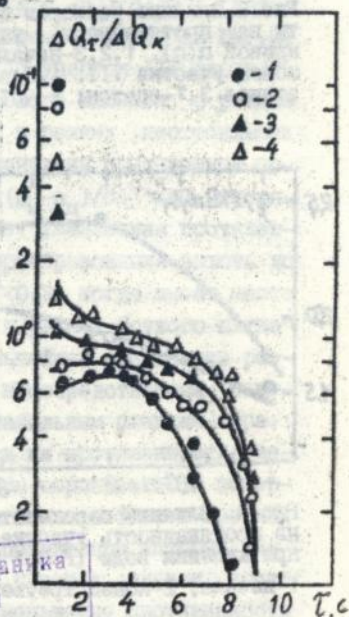


Рис.7. Отношение теплоты отводимой при росте ПП (ΔQ_{τ}) к обеспечиваемой испарением из КС шероховатости (вода, $P=0,1$ МПа, $d_0=2,5$ мм). 1,2,3,4 - $q = 0,39$ МВт/м²; 0,57; 0,81; 1,08.



ЛНБ им. В.И. Степановика
АН Украины

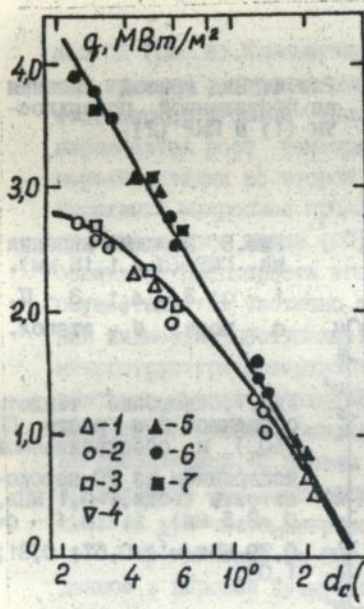


Рис.8. Влияние размеров поверхности на протяженность участка III кривой $\alpha(q)$. 1,2,3-начало; 4,5,6-конец участка III. 1,5-вода; 2,6-этанол; 3,7-ацетон; 4-... 4.

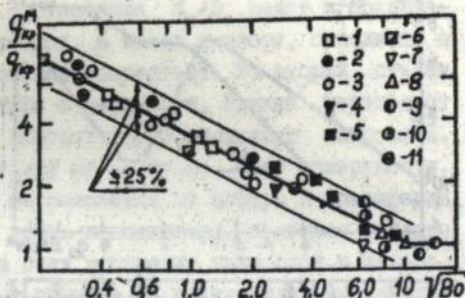


Рис.10. Обобщение опытных данных по $q_{кр}$ при кипении на ПМР. 1,5,6-вода; 2,10 - этанол; 4 - СС1₄; 7- водород; 8-азот; 9-метанол; 11-МД-3Ф. Данные: 1,2,3,4-автора; 5,11-Кравца; 6-Дервянко; 7,8-Григорьева; 9,10-Линарда. Сплошная линия-расчет по (8)

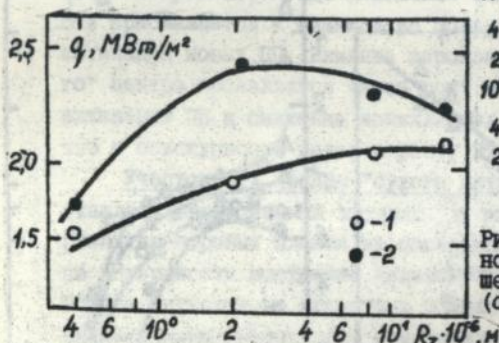


Рис.9. Влияние шероховатости поверхности на протяженность участка III кривой $\alpha(q)$ при кипении воды ($P=0,1$ МПа; $d_0=1,15$ мм). 1-начало; 2-конец третьего участка.

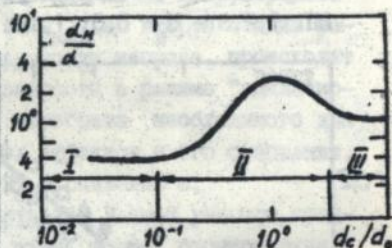


Рис.11. Зависимость интенсивности теплообмена от соотношения размеров поверхности (d_0) и парового пузыря (D_0).

нном периметром ПМР за пределами которого $\Delta T = 0^\circ\text{K}$ и сухим пятном в пределах которого $\Delta T = (25-30)^\circ\text{K}$. Мелкие ПП, действующие на границе участка, затрудняют подток жидкости к границе СП, ослабляют влияние конвективных потоков и снижают расход жидкости, обеспечиваемый КС шероховатости. Очевидно, что любые воздействия (механические, физико-химические и т. д.) на микро- и макроструктуру ПМР, вызывающие увеличение числа действующих на границе ПМР ПП, приводит к сокращению его протяженности. Это обусловлено нехваткой теплоносителя в центральной части участка и быстрому росту размеров СП. При увеличении размеров СП в центре ПМР условия для образования ПП на его границе ухудшаются, т. е. имеет место подавление пузырькового кипения.

Мощные конвективные потоки жидкости, существующие на границе ПМР, неослабленные кипением на границе участка, периодически срывают паровую пленку, жидкость смачивает ПМР — происходит переход от участка III к IV кривой $\alpha(q)$ (рис. 5). На рис. 8 приведена зависимость изменения протяженности участка III кривой $\alpha(q)$ от размеров поверхности. В качестве характерного размера ПМР использовано выражение $d_0 [g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})/\sigma]^{0.5}$, которое позволяет описать особенности кризисных режимов на ПМР. Из рис. 8 видно, что при $d_0 [g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})/\sigma]^{0.5} > 3$ участок III отсутствует. Имеет место переход от пузырькового кипения в режиме "нескольких" центров парообразования к режиму нестабильных паровых пленок, что характерно для кипения на протяженной поверхности. При уменьшении величины $d_0 [g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})/\sigma]^{0.5} < 3$, протяженность участка III возрастает за счет уменьшения протяженности режима "нескольких" центров парообразования вплоть до его исчезновения при $d_0 [g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})/\sigma]^{0.5} < 0.3$, когда имеет место переход от режима "единичного" центра к режиму "сухого пятна" и нестабильным паровым пленкам. При дальнейшем уменьшении размеров поверхности нагрева имеет место непосредственный переход от режима "единичного" центра к стабильным пленкам пара.

О влиянии шероховатости поверхности на протяженность участка III можно судить по рис. 9. С ростом шероховатости поверхности начало участка III сдвигается в область более высоких q , а зависимость плотностей теплового потока, при которых имеет место переход к режиму нестабильных паровых пленок, носит ярко выраженный нелинейный характер. Уменьшение протяженности участка III с ростом шероховатости поверхности связано, как и в случае увеличения размеров поверхности, с расширением актив-

ных впадин способных генерировать ПП при данном давлении, затрудивающих подток жидкости к центральной зоне нагревателя, где существует сухое пятно. При высокой чистоте обработки поверхности в силу малого располагаемого набора впадин предельное насыщение поверхности ЦП достигается при работе на ПМР двух, а при $Rz < 0,5$ мкм (вода, 0,1 МПа) одного ЦП. В результате протяженность участка сокращается, либо он исчезает полностью, при этом имеет место непосредственный переход от режима "единичного" ЦП к кризису теплообмена.

Участок V (кризис теплоотдачи на ПМР). С момента, когда основание паровой пленки становится равным d_0 на кривой $\alpha(q)$ начинается участок V. Вид кривой на этом участке зависит от режимных параметров процесса, при этом может наблюдаться прекращение роста или падение α (рис. 5.а,б). Поверхность нагрева полностью изолирована пленкой пара, т.е. участок V является по существу кризисом теплоотдачи при кипении на ПМР, который относится к числу наиболее изученных вопросов влияния размеров поверхности на теплообмен при кипении. Известно, что на протяженных поверхностях возникновение пленочного режима кипения равновероятно на любой ее части и величина $q_{кр}$ не зависит от линейного размера системы. На ПМР такого рода автомодальность нарушается, при этом наблюдается существенный рост q_{max} при уменьшении d_0 . Увеличение $q_{кр}$ наблюдается до определенного значения $Bo = d_0 [g(\rho_{ж} - \rho_{п}) / \sigma]$, после чего поверхность может рассматриваться как протяженная. Представление опытных данных в виде $q_{кр}^M / q_{кр} = f(Bo)$ показывает, что в зависимости от формы теплоотдающей поверхности наблюдается расхождение опытных данных.

В литературе приведены расчетные зависимости для каждого вида поверхности нагрева, имеющие общий вид

$$q_{кр}^M / q_{кр} = C Bo^{0,25} \quad (7)$$

но отличающиеся корреляционными множителями. Так значение C для горизонтальных пластин (получено в настоящем исследовании) составляет 3,4; для сфер - 2,5; для цилиндров - 1,4.

Столь существенное влияние формы ПМР на $q_{кр}$ обусловлено особенностями гидродинамической обстановки, складывающейся на ПМР и условиями подтока жидкости к осушенным участкам поверхности. Очевидно, что при одинаковой длине смоченного периметра площадь поверхности, с которой происходит отбор энергии в паровую пленку, зависит от геометрии ПМР. Для учета влияния формы нагревателя на $q_{кр}$ может быть использовано отношение пло-

щади поверхности ($F_{\max}$) тела, при которой смоченный периметр достигает максимального значения к площади горизонтальной круглой пластины. Величина $(F_{\max}/F_{\text{пл}})^n$ учитывает отличия в условиях формирования сухого пятна для данной поверхности нагрева. Так для сферической поверхности $F_{\max}$ равна поверхности полусферы, когда смоченный периметр максимальный, а для цилиндра равна его поверхности. Представление зависимости (7) в виде:

$$q_{\text{кр}}^m/q_{\text{кр}} = 3,4 \cdot \text{Bo}^{-0,25} (F_{\max}/F_{\text{пл}})^{0,446} \quad (8)$$

позволяет обобщить экспериментальные данные различных авторов (рис.10) по критическим тепловым потокам при кипении на ПМР.

Существенное влияние на величину $q_{\text{кр}}$, помимо размеров поверхности, оказывает и ее микрогеометрия, т.к. в условиях существования на обогреваемом участке стабильных паровых пленок значительная доля жидкости поступающей на испарение обеспечивается КС, возникающими в микроструктуре шероховатости. ПМР является единственной ячейкой формирования паровой пленки, которая может достигнуть стабильного состояния только при равенстве $D_{\text{км}} = d_0$. Однако, условие $D_{\text{км}} = d_0$ является необходимым, но не достаточным условием для снижения величины α .

При достижении паровой пленкой границ обогреваемого участка и отсутствием периодического смачивания ПМР, что наблюдается на участке IV кривой $\alpha(q)$, жидкость на испарение в объем пленки может поступать только по капиллярным каналам, образованным микроструктурой шероховатости. При этом, эффективная длина испарения l (3) не является постоянной величиной. Она уменьшается с ростом q , компенсируя нехватку капиллярного напора, и обеспечивает отвод все возрастающих значений Q (3). Очевидно, что минимальная эффективная длина испарения обусловлена гидродинамической устойчивостью границы раздела жидкость-пар в каналах, образованных микроструктурой поверхности и несколько больше величины $S_{\min}$ (5). Сравнение величин q , соответствующих началу (прекращение роста α) и концу (падение α) участка V кривой $\alpha(q)$ с величиной $q_{\max}$ (значение $q_{\max}$ рассчитывалось по зависимости (4), где в качестве l использовалось $S_{\min}$, а величина рассчитанного теплового потока относилась к площади обогреваемого участка) показало, что снижение интенсивности теплообмена на участке V кривой $\alpha(q)$ связано с нехваткой жидкости, поступающей к границе СП за счет капиллярных сил микроструктуры и достижением величин $q_{\max}$. При этом, для поверхности с $Rz=20$ мкм достигнуть величин $q_{\max}$ не удалось, а

для $Rz=0,4$ мкм кризис наблюдался на участке III кривой $\alpha(q)$.

Интенсивность теплообмена. Фундаментальные исследования В.И.Толубинского показали, что величина $\alpha = f(D_0, f)$. При этом зона наиболее интенсивного отвода теплоты ограничена максимальным размером D_{km} основания пузыря. В условиях кипения на ПМР величине D_0 (D_{km}) сильно зависит от микрогеометрии и плотности теплового потока. В зависимости от режимных параметров может наблюдаться как укрупнение, так и уменьшение D_0 , что соответствующим образом сказывается на величине α . Это связано с тем, что при кипении в условиях свободного движения, интенсивность теплоотдачи определяется долей поверхности нагрева, на которой происходит интенсивный сток теплоты в 3-м действии III. Для протяженной поверхности нагрева эта величина может быть оценена произведением числа действующих III на их сечение в момент отрыва, т.е. величиной nD_0^2 . При кипении на ПМР в режиме "единичного центра" $n = (1/(\pi/4)d_c^2))D_0^2$, т.е. $nD_0^2 \sim D_0^2/d_c^2$. Следовательно в условиях ПМР интенсивность теплоотдачи оказывается функцией размеров поверхности нагрева и III.

На рис. II представлены результаты исследований интенсивности теплоотдачи при кипении на ПМР. Видно, что при $d_0/D_0 < 3$ наблюдается рост α . Это связано с существованием в окрестности активного III зоны влияния, с которой III отбирает энергию. На протяженных поверхностях зона влияния центра составляет $0,55D_0$, т.е. не выходит за пределы D_{km} . В то же время на ПМР удается получить режимы, при которых зона влияния близка к единице, при этом достигается предельный уровень интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении (рис. II), когда значение α_m вдвое превосходит α для протяженной поверхности. Очевидно, что при $d_0/D_0 = 0,5 \dots 0,6 - \alpha_m = \alpha$, что и наблюдалось в экспериментах. Дальнейшее уменьшение размеров поверхности ($d_0 < 0,3D_0$) приводит к существованию на ПМР режима одиночных III во всем диапазоне от q_0 до $q_{кр}$, а доля теплоты, подведенная в пузырь за счет испарения MC близка к единице. При $d_0/D_0 < 0,1$ размер поверхности не оказывает влияние на α . В этом случае достигается критическая плотность III (для воды при $P=0,1$ МПа, $n=2 \cdot 10^7$ м⁻²) и наблюдается непосредственный переход от однофазной конвекции к кризису теплоотдачи.

Поэтому при обобщении опытных данных по α при кипении на ПМР необходимо учитывать соотношение d_0/D_0 . Влияние макрогеометрии поверхности на теплообмен наиболее ярко проявляется в

области пониженных давлений, для которых характерен динамический режим роста и отрыва ПП. Воспользовавшись зависимостью для D_0 , предложенной Ю.А.Кириченко, было получено выражение для учета соотношения размеров ПП и нагревателя.

$$L = d_0/D_0 = 0,73(Ja \text{ } Pr/Bo)^{0,73}$$

Представляя кривую (рис.II) в виде степенной функции для определенного интервала изменения значений L , было получено выражение для определения α при кипении на ПМР

$$Nu_m = C Nu L^n$$

которое имеет различные значения постоянных C и n в зависимости от величины L . При $L < 0,6$; $C=3,3$; $n=0,7$; при $L > 0,6$; $C=1,7$; $n=-0,75$; при $L > 3$ $Nu_m = Nu$. Зависимость справедлива при $P/P_{кр} = (0,2 \dots 3) \cdot 10^{-2}$; $0,07 < L < 3$. При этом максимальное значение α достигается при $0,75 < L < 1,5$.

По результатам исследования влияния размеров поверхности на интенсивность и кизис теплообмена при кипении были определены границы ПМР. К категории ПМР могут быть отнесены поверхности, для которых выполняется соотношение

$$0,1 < d_0 / (\sigma / g (\rho_{ж} - \rho_{п}))^{0,5} < 10$$

После рассмотрения влияния макрогеометрии поверхности проведен анализ влияния ее микрогеометрии на интегральные характеристики кипения на ПМР и протяженных поверхностях.

Как отмечалось выше, определяющее влияние на величину α и механизм теплоотвода оказывают условия поступления жидкости в основание растущего ПП. При этом в условиях $d_0 > D_0$ размер зоны контакта пузыря с поверхностью определяется балансом массовых расходов жидкости на испарение в объем ПП и обеспечиваемого капиллярной структурой микрошероховатости. Поэтому при уменьшении шероховатости, соответственно и $C_{кап}$ (рис.3), следует ожидать увеличение D_0 и снижение α .

В настоящее время является общепризнанным существование различных механизмов переноса теплоты при кипении, связанных с образованием, ростом и отрывом ПП. Очевидно, что отдавая предпочтение одному из механизмов теплообмена модель отражает одну сторону явления, а не совокупность главных факторов. Однако, поскольку необходимо выяснить роль одного фактора-шероховатости поверхности-такой подход вполне допустим. Считая, что вся теплота отводится от поверхности с ПП в виде скрытой теплоты фазового перехода

$$Q = C D_0^3 f g \rho_{п} \quad (9),$$

а доля теплоты, подводимая в ПП различными механизмами тепло-

обмена, постоянна и независит от условий роста. Для случая испарения жидкости из капиллярной структуры микрошероховатости можно записать $Q = C D_0 K_{Rz} \sigma_p r / \mu_{\text{ж}}$ (10) где C - корреляционный множитель, учитывающий числовые константы, включая и плотность Π ; $K_{Rz} = R_{\text{эф}}^4 n / R_{\text{кап}}^4$; n, i из (1-5).

Приравняв (9) и (10), можно выяснить механизм влияния шероховатости на теплообмен при кипении

$$D_0^2 f = C \sigma_p / \mu_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} K_{Rz} \quad (11)$$

Он проявляется через изменение локальных характеристик Π .

При составлении обобщающей зависимости $\alpha(q)$, учитывающей шероховатость поверхности, следует помнить о существовании предельного уровня шероховатости (Глава 2).

$$K_{Rz}^{\text{пр}} = C[(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) / \rho_{\text{п}}]^{0,25} \quad (12)$$

для воды $C=3 \cdot 10^{-14}$; для органических жидкостей $C=4 \cdot 10^{-14}$.

В данном исследовании в качестве базовой использована зависимость $\alpha(q)$, предложенная В.И.Толубинским, т.к. она основана на представлениях об определяющем влиянии внутренних характеристик на теплообмен. В полной записи она имеет вид

$$Nu = C K^m Pr^m Fo^m [(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) / \rho_{\text{п}}]^{m_4}$$

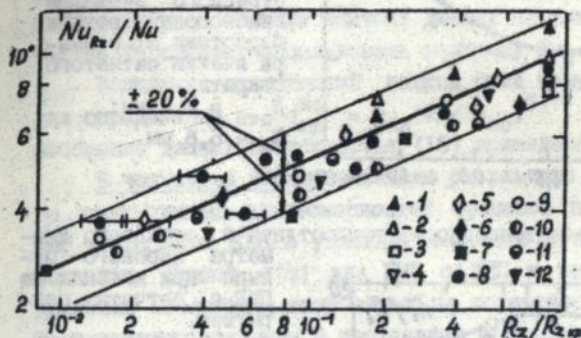
При кипении на поверхностях с $K_{Rz} > K_{Rz}^{\text{пр}}$ показатели степени m_3, m_4 близки к 0, поэтому в окончательной записи величины Fo и $\rho_{\text{п}}$ были опущены автором. Однако, как следует из (11), влияние шероховатости проявляется через изменение величины числа Фурье ($Fo = a / D_0^2 f$). Представляя Fo , согласно (11), в виде шероховатости ($Fo_{\text{ж}} = a \mu_{\text{ж}} \rho_{\text{п}} / \sigma_p K_{Rz}$), а $\rho_{\text{п}}$, согласно (12), в виде предельного уровня шероховатости поверхности удалось получить зависимость $\alpha(q)$, учитывающую микрогеометрию поверхности, которая для воды имеет вид $Nu_{Rz} = 285 Nu Fo_{\text{ж}}^{-0,4} \rho_{\text{ж}}^{0,25}$ (13)

Однако существенные различия в величине предельного уровня шероховатости (до 30%) для воды и органических жидкостей приводят к изменению величины эмпирического коэффициента в (13), что затрудняет ее практическое применение. Упрощение зависимости (13) достигнуто за счет представления предельного уровня шероховатости в виде $Fo_{\text{ж}}^{\text{пр}} = a \mu_{\text{ж}} \rho_{\text{п}} / \sigma_p K_{Rz}^{\text{пр}}$, где $K_{Rz}^{\text{пр}}$ определяется по (12). Тогда обобщающая зависимость для $\alpha(Rz)$ имеет вид $Nu_{Rz} = C Nu (Fo_{\text{ж}} / Fo_{\text{ж}}^{\text{пр}})^n$, а соответствующая ей расчетная формула весьма проста

$$Nu_{Rz} = Nu (Rz / Rz_{\text{пр}})^{0,27} \quad (14)$$

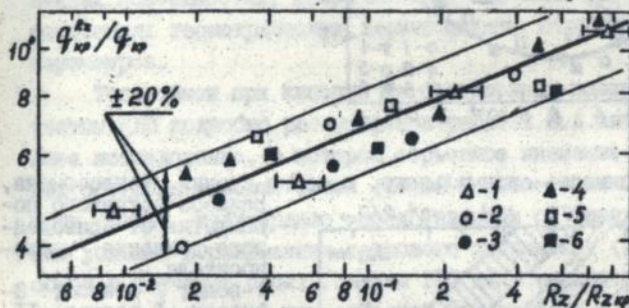
На рис.12 приведено обобщение экспериментальных данных по кипению на поверхностях с шероховатостью ($Rz=0,3...20$ мкм),

Рис.12. Обобщение опытных данных по интенсивности теплообмена при кипении на протяженных поверхностях и ПМР с различной шероховатостью. 1,2,3,8,9-вода; 4-метанол; 5- ϕ -113; 6- ϕ -12; 7- ϕ -11; 10-этанол; 11-ацетон; 12- CO_2



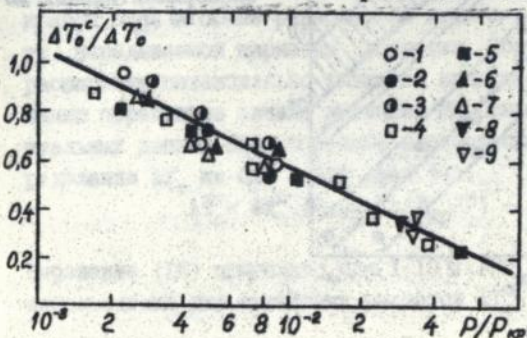
Данные: 1-Гайдарова; 2-Барона; 3,4-Сингха; 5,6-Даниловой; 8-12 - автора. 9-12 - кипение на ПМР. Сплошная линия расчет по (14).

Рис.13. Обобщение опытных данных по кризису теплообмена при кипении на протяженных поверхностях и ПМР с различной шероховатостью. 1,2,3-вода; 4-этанол; 5-ацетон; 6- CO_2 . Данные: 1-Аладьева; 2-6-автора; 3-6- кипение на ПМР. Сплошная линия расчет по (15).



ева; 2-6-автора; 3-6- кипение на ПМР. Сплошная линия расчет по (15).

Рис.14. Начало кипения на поверхностях с КШП. 1,2-вода; 3-этанол; 4-ацетон; 5- CO_2 ; 6,8-этанол; 7- ϕ -113; 9- ϕ -22. Данные: 1,3,4,5-автора; 2-Кузмина-Кичта; 6,7-Ройзена; 9-Даниловой. Сплошная линия расчет по (16).



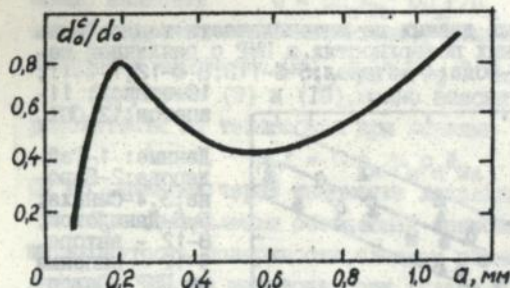


Рис.15. Зависимость отрывного диаметра газового пузыря при барботаже от размера ячейки сетчатого покрытия.
 $D_{\text{отв}} = 2,0$ мм;
 $D_0 = 6,6$ мм



Рис.16. Изменение интенсивности теплоотдачи и отрывного диаметра парового пузыря при кипении на ГМР с сетчатым покрытием.
 $d_0 = 1,15$ мм; $a = 1,0$ мм.
 1,4-вода; 2,5-этанол;
 4,6-ацетон.
 1,2,3- D_0 ; 4,5,6- A_t .

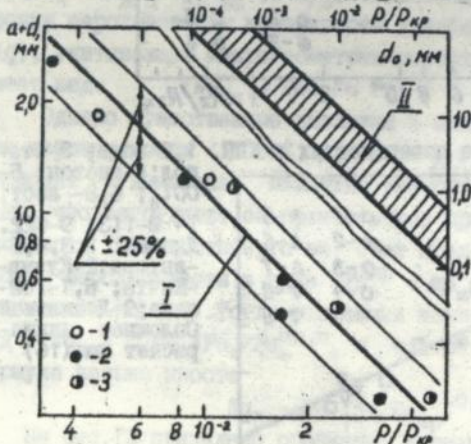


Рис.17. Зависимость оптимального, с точки зрения теплообмена, размера сетчатого покрытия от приведенного давления теплоносителя.
 1-вода; 2-этанол; 3-ацетон. I-расчет; II-область существования экспериментальных данных по D_0 .

как протяженных, так и малого размера жидкостей с существенно различающимися теплофизическими свойствами (диапазон приведенных давлений $9 \cdot 10^{-4} < (P/P_{кр}) < 0,14$) - зависимостью (14). Зависимость справедлива в случае $Rz/Rz_{кр} < 1$, при этом $Nu_{кон} < Nu_{Rz} < Nu$, где $Nu_{кон}$ - интенсивность теплообмена в однофазной области кривой кипения. При обобщении опытных данных по кипению на ГМР в качестве Nu следует использовать величину Nu_m .

Используя аналогичный подход была получена зависимость для определения $q_{кр}^{Rz} = q_{кр} (Rz/Rz_{кр})^{0,17}$ (15). Обобщение данных зависимостью (15) приведено на рис.13.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования закономерностей процесса парообразования на ГМР с сетчатым КПП в условиях большого объема и капиллярной подпитки. Кривые $\alpha(q)$ для ГМР с КПП в условиях свободного движения аналогичны полученным на поверхностях без покрытия. К замеченным отличиям в протекании процесса следует отнести - более низкие значения ΔT_o ; интенсификация теплоотдачи при использовании тонких сетчатых покрытий, отсутствующая на протяженных поверхностях; более высокие значения $q_{кр}$ при некоторых сочетаниях геометрических характеристик структуры и режимных параметров.

Теплообмен при кипении на протяженных поверхностях с сетчатым КПП подробно рассмотрен в работах В.А.Антоненко. Настоящее исследование, в котором серьезное внимание уделено влиянию обогрева узловых точек (места переплетения проволок основы сетки), подтвердило представления об определяющем влиянии условий формирования теплового пограничного слоя (ТПС) на теплообмен в сетчатых слоях. Толщина ТПС на поверхности с КПП больше, чем на свободной поверхности. Это связано с ухудшением условий подтока жидкости к поверхности в конвективной области кривой $\alpha(q)$ и более равномерным перегревом ТПС за счет теплоты, передаваемой каркасом покрытия. Рост толщины ТПС ведет к расширению потенциально активных впадин-ПВ, что ведет к уменьшению перегревов начала кипения. На основе анализа экспериментальных данных была получена эмпирическая зависимость для определения ΔT_o на ГМР с КПП (рис.14).

$$\Delta T_o^0 = \Delta T_o^m [0,22 \ln(P/P_{кр}) - 0,45] \quad (16)$$

Выражение (16) применимо при $1 \cdot 10^{-3} < P/P_{кр} < 5 \cdot 10^{-2}$ и может быть использовано для оценочных расчетов ΔT_o^0 на протяженных повер-

ностях. Величина ΔT_0^M определяется по (6).

Вскипание теплоносителя при более низких перегревах способствует росту α . Однако этот эффект существенен только при небольших тепловых нагрузках (порядка $0,2 q_{кр}$). В то же время на ПМР с КПШ обнаружен рост α (при определенных значениях геометрических характеристик покрытия) во всем диапазоне изменения тепловых потоков вплоть до $q_{кр}$. Рост α на ПМР с КПШ обусловлен изменением D_0 и f растущих на ней ПШ. С целью изучения влияния каркаса покрытия на D_0 проведены модельные эксперименты, основанные на аналогии кипения и барботажа. Был обнаружен сложный характер влияния сетчатого покрытия на D_0 (рис.15), связанный с изменением механизма их роста и отрыва.

При этом наблюдается: -отрывные размеры пузыря не зависят от характеристик сетчатого слоя и равны наблюдаемым на поверхности без покрытия. Этот случай можно рассматривать как нанесение на поверхность сетки с бесконечно большим размером ячейки в свету; -уменьшение отрывных размеров пузырей при уменьшении α за счет появления в структуре дополнительного капиллярного давления, выдавливающего пузырь из покрытия; -рост отрывных диаметров за счет образования газовых ассоциаций при слиянии отдельных пузырей над поверхностью сетчатого покрытия; -уменьшение отрывных диаметров пузырей до величин, определяемых только характеристиками покрытия и не зависящих от диаметра барботирующего отверстия. Этот случай можно рассматривать как нанесение покрытия на отверстие бесконечно большого размера. Последний механизм в условиях кипения на поверхности с сетчатым покрытием наблюдается при наличии дефектов прижатия структуры и подробно рассмотрен В.А.Антоненко, а первый нельзя рассматривать как процесс на поверхности с КПШ.

Поэтому основное внимание в исследованиях было уделено режимам, при которых наблюдалось влияние геометрии покрытия на внутренние характеристики пузырей. В условиях ПМР это особенно важно, поскольку существует зависимость $\alpha = f(d_0 / D_0)$. На рис.16 приведено сравнение относительного изменения интенсивности теплоотдачи и D_0 (в качестве характеристики D_0 использована величина A_+). Из рисунка видно, что максимальные величины α достигаются при наименьших значениях отрывных размеров ПШ. В результате анализа совокупности кривых $\alpha^0 / \alpha_m = f(P/P_{кр})$ были определены оптимальные с точки зрения теплоотдачи геометрические характеристики сетчатого КПШ $(\alpha + \delta)_{опт} = 1,1 \cdot 10^{-2} P_{кр} / P$.

Кривая (рис.17) эквидистантна области, в которой находятся экспериментальные данные по D_0 . Это позволило установить, что оптимальные геометрические характеристики сетчатого покрытия близки к размерам максимальной зоны контакта III с поверхностью в период его роста (размеру отверстия при барботаже). В Главе 3 показано, что величина $D_{\text{кп}}$ зависит от капиллярного напора, развиваемого микроструктурой шероховатости на границе сухого пятна, и определяет скорость роста III после испарения микрослоя. Капиллярный напор, развиваемый сетчатым КШП значительно превосходит характерный для микрошероховатости. Улучшение условий поступления жидкости в основание растущего III является основной причиной уменьшения влияния обработки поверхности на теплообмен и увеличение его интенсивности. При использовании покрытия оптимального размера $\alpha^0 = 2\alpha$, что является предельным уровнем интенсификации теплоотдачи при кипении.

В связи с тем, что α при кипении на ГМР с КШП определяется типоразмером использованной структуры для сетчатого покрытия с $\alpha\delta < 1, 1 \cdot 10^{-2} P_{\text{кр}}/P$ была получена зависимость для расчета интенсивности теплообмена

$$Nu_m^0 = 2 Nu_m((\alpha\delta)/(a/g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})))^{0,5}, 0,9 \quad (17)$$

В дальнейшем изучено влияние геометрических характеристик и толщины покрытия на $q_{\text{кр}}$. Статистический анализ многослойных сетчатых структур (число слоев от 2 до 8) показал, что для взаимного расположения ячеек и проволок основы характерен нормальный закон распределения со средним затемнением ячейки вышележащим слоем 1,35 при дисперсии 1,16. Таким образом, наиболее вероятный радиус поры в поперечном сечении многослойной структуры составляет $R_{\text{ж}} = (a(\alpha - 1,35 \pi))^{0,5}$, где π - число слоев сетки, лежащих выше первого. В продольном направлении для плотно прижатых сетчатых слоев зазор равен $\delta/2$, а радиус поры $R_{\text{жж}} = (\alpha\delta/2)^{0,5}$. Отношение $R_{\text{ж}}/R_{\text{жж}}$ определяет направление роста первого (газового) пузыря. При $R_{\text{ж}} < R_{\text{жж}}$ пузырь растет вдоль поверхности нагрева, что позволяет определить предельную толщину (число слоев) сетчатого покрытия в виде $n = (2\alpha - \delta)/2,60$. Для стандартных сеток ГОСТ 3584-74, применявшихся в настоящем исследовании отношение δ/a изменяется от 0,7 (для мелких сеток $\alpha < 0,18$ мм) до 0,25 (для сеток с $\alpha > 2$ мм). Соответственно, предельная толщина сетчатого покрытия может составлять от 2 до 7 слоев. Для большинства сеток оптимального размера предельная толщина покрытия равна 3-4 слоям.

Сложный характер зависимости $q_{кр}$ от геометрии покрытия обусловлен противоположным влиянием толщины и размера ячеек. Увеличение толщины покрытия препятствует эвакуации паровой фазы от поверхности нагрева, способствуя слиянию отдельных паровых пузырей в пленки в пределах первого слоя, т.е. снижает величины $q_{кр}$. В то же время, увеличение размера ячейки не только улучшает условия удаления паровой фазы, но и препятствует (за счет изолирующего влияния каркаса) слиянию действующих соседних ячеек III. Однако при достаточно больших размерах ячейки появляется возможность образования внутри ее самой парового облака, которое значительно ухудшает теплоотдачу.

Таким образом, при обобщении опытных данных по $q_{кр}$ следует учитывать влияние двух факторов - размер ячейки в свету и толщину покрытия. Первый определяет изменение отрывного диаметра парового пузыря (характеризует изолирующее влияние покрытия) и может быть учтен величиной $A = (a + \delta) / (a/g(\rho - \rho_v))^{0,5}$. Второй - гидравлическое сопротивление (направление роста III). Относительную толщину можно учесть в виде $h = a/2\delta n$. Правомерность использования предложенных симплексов для описания сетчатой КПП подтверждена последними исследованиями.

Совместное рассмотрение влияния на величину $q_{кр}$ давления, размера ячейки и толщины капиллярно-пористого покрытия, позволило получить зависимость для определения критических тепловых потоков на поверхностях с сетчатым КПП малого размера выполненном из сеток с размером ячейки равным или меньше оптимального.

$$q_{кр}^0 = 0,25 q_{кр}^M (a/h)^{0,8} A^{0,1} (P/P_{кр})^{-0,2} \quad (18)$$

Данная зависимость справедлива при $P/P_{кр}$ от 10^{-4} до $3 \cdot 10^{-2}$; $a + \delta < 1,1 \cdot 10^{-6} (P_{кр}/P)$; a/h от $5 \cdot 10^{-2}$ до 5 и обобщает опытные данные по кипению на ПМР с точностью $\pm 8\%$ (рис.19).

Как следует из (18) влияние параметра A на величину $q_{кр}$ незначительно, поэтому в окончательном виде опытные данные по критическим тепловым нагрузкам при кипении на затопленных поверхностях с сетчатыми покрытиями (как ПМР, так и протяженных) с точностью 40% обобщаются следующей зависимостью

$$q_{кр}^0 = 0,55 q_{кр}^M (a/h)^{0,8} (P/P_{кр})^{-0,14}$$

Данная формула применима для сеток с ячейками более 0,08 мм. Предложенной зависимостью обобщены экспериментальные данные разных авторов для воды, метилового, бутилового и этилового спиртов, ацетона и фреона Ф-113.

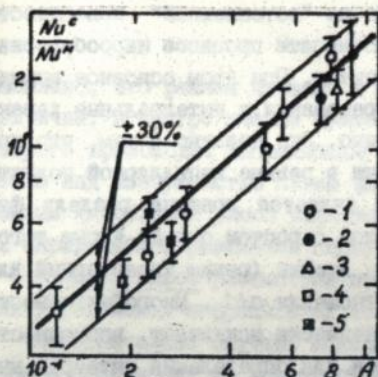


Рис.18. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении на ПМР с однослойным сетчатым покрытием. 1,4-вода; 2-этанол; 3,5-ацетон. Данные: 1,2,3-автора; 4,5-Каширского и Печенегова. Сплошная линия-расчет по (17).

Рис.19. Обобщение опытных данных по $q_{кр}^0$ при кипении на ПМР с сетчатым покрытием. 1-вода; 2-этанол; 3-ацетон. Сплошная линия-расчет по (18).

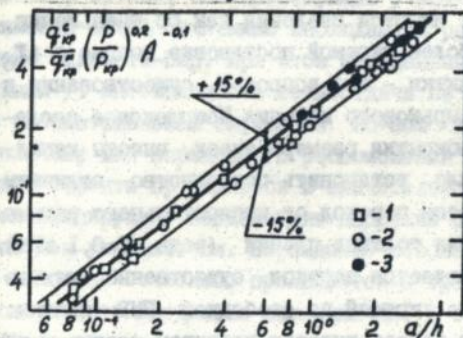


Рис.22. Влияние частоты колебаний индуктора на температуру стенки при переходе к кипению. Ускорение индуктора $g_B = 6g$.

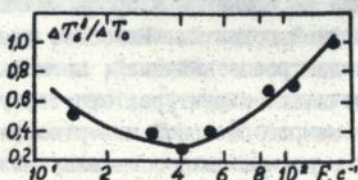


Рис.20. Толщина пленки жидкости при которой наблюдается переход от испарения к кипению в условиях капиллярной подпитки сетчатого покрытия.

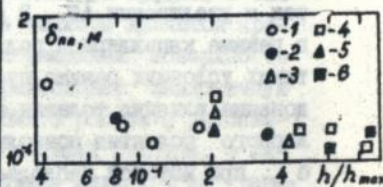
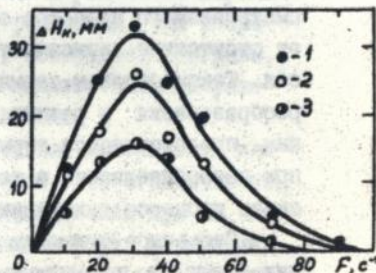


Рис.21. Влияние частоты и ускорения индуктора на высоту подъема жидкости в цилиндрическом капилляре. $d_{кап} = 300 \text{ мкм}$; 1,2,3- $g_B = 6g$; 4,5- $g_B = 3g$.



После изучения теплообмена на "затопленной" поверхности с сетчатым КПП рассмотрены особенности процесса парообразования в условиях капиллярной подпитки. При этом основное внимание уделялось механизму парообразования, а интегральные характеристики изучались опосредованно. Это связано с тем, что при оценке интенсивности теплоотдачи в режиме капиллярной подпитки основной неопределенностью является граница раздела фаз (жидкость-пар), которая изменяется с ростом q и H . Кроме того, в условиях обогрева единичной ячейки (режим характерный для ПМР) α зависит от величины соотношения α/d_0 . Многофакторность рассматриваемого процесса практически исключает возможность получения расчетных зависимостей для определения интегральных характеристик парообразования в режиме "единичного" мениска.

Значительный интерес при парообразовании в "единичном" мениске представляет переход от режима испарения к кипению (над поверхностью ячейки периодически возникает купол внешне напоминающий паровой пузырь). Имеются сведения как об уменьшении, так и увеличении ΔT_0 . В более широкой постановке вопрос о ΔT_0 в режиме капиллярной подпитки - это вопрос о существовании в таких условиях режима пузырькового кипения. Комплексное исследование влияния толщины покрытия, размера ячеек, высоты капиллярного поднятия позволило установить постоянство величины $\delta_{пл}$, при которой наблюдается переход от испарительного режима к кипению (рис. 20). Средняя толщина пленки (вода, $P=0,1$ МПа) 125 мкм, при которой наблюдается переход существенно меньше критических толщин разрыва кипящей на свободной ПМР пленки. Поэтому переход к кипению сопровождается разрывом пленки и образованием в ячейке сухого пятна. О существенных отличиях рассматриваемого процесса от пузырькового кипения свидетельствует отсутствие зависимости ΔT_0 и A_t от шероховатости поверхности. Таким образом, термин кипение не применим к процессу парообразования в режиме капиллярной подпитки. Наиболее удачным представляется термин "внецентровое кипение", поскольку при парообразовании в тонких сетчатых структурах отсутствует связь процесса генерации пара с микрогеометрией поверхности.

Серьезное внимание в работе уделено вопросам визуализации процесса парообразования в режиме "единичного" мениска. При этом проводилась кино-фотосъемка процесса "в плане" и "на просвет", а так же изучался характер накипеобразования в различных режимах теплообмена. В результате исследований ус-

тановлено, что режимы кипения и капельного уноса из структуры идентичны. В центре ячейки существует сухое пятно, на границе которого происходит интенсивное испарение жидкости. Смыкание пленки над поверхностью пятна (кипение) или срыв капель с его границы (капельный унос) определяется скоростью пара в ячейке, определяемой режимными параметрами процесса.

В пятой главе рассмотрен процесс кипения на ПМР в условиях управляемых вибрационных воздействий (ВВ).

Первоначально изучено кипение на "обращенной" ПМР, когда кипение происходит на нижней стороне горизонтальной поверхности в условиях вынужденных колебаний сосуда с жидкостью. Приведено описание экспериментальной установки и методики проведения исследований. Установлено, что в области плотностей теплового потока, соответствующих участку I кривой $\alpha(q)$ в зависимости $\Delta T(F)$ отчетливо наблюдаются резонансные эффекты в системе жидкость-пар. При этом резонансные частоты являются кратными f . Интенсивность теплоотдачи на обращенной поверхности в рассматриваемом случае на 25-30% превосходит аналогичную величину для нормального расположения ПМР. С ростом q резонансные эффекты проявляются в значительно меньшей степени, а интенсифицирующее воздействие вибрации объема жидкости на теплообмен уменьшается. Вырождение резонансных эффектов с ростом q наиболее отчетливо проявляется в третьем режиме $\alpha(q)$, когда поверхность предельно насыщена ИП. В этом случае резонансные эффекты отсутствуют. Однако на всех участках кривой $\alpha(q)$ на "обращенной" ПМР удалось получить режимы перемещения пара в направлении как перпендикулярном силам гравитации, так и против их действия, а так же удержания ИП у поверхности нагрева, что позволит управлять теплоотдачей при кипении в таких условиях за счет внешних вибрационных воздействий.

Однако метод ВВ, основанный на колебаниях поверхности или жидкости требует значительных энергозатрат, что ограничивает его применение. Поэтому был исследован теплообмен при ВВ на теплоноситель независимыми жесткими индукторами колебаний, имеющими внутреннюю полость, с открытым со стороны поверхности торцом. Изучение рабочих характеристик индукторов различной формы (цилиндр, полусфера, прямой и обратный конус) в отсутствие теплообмена показало, что их резонансные характеристики не зависят от формы, а $F_{рез} = 30-40$ Гц. На резонансных частотах в объеме жидкости возникают струйные пульсирующие течения, и на-

блюдается увеличение динамической составляющей давления. Величина ΔP_d пропорциональна ускорению ВВ. На частотах отличных от $F_{рез}$ увеличение ΔP_d отсутствует. Появление динамической составляющей давления в системе приводит к аномально высокому подъему жидкости в капиллярах - низкочастотный капиллярный эффект, что связано с изменением динамического угла смачивания в условиях ВВ. На рис. 21 приведены результаты исследования влияния ВВ на резонансных частотах на величину $\Delta P_{кап}$ в цилиндрических капиллярах. Согласно модели (Глава 2) увеличение $\Delta P_{кап}$ при $Rz < Rz_{пр}$ должно вести к изменению внутренних характеристик ПП и росту α .

Главное отличие ВВ от перемешивания жидкости мешалками заключается в существовании струйных пульсирующих течений в ТПС, что наиболее ярко проявляется при переходе от конвекции к кипению. С одной стороны, ВВ приводит к возникновению в ТПС знакопеременных пульсаций давления, приводящих к нарушению равновесия парогазовых зародышей внутри пор поверхности нагрева, и облегчается их активация при меньших ΔT_0 . С другой стороны, интенсивное виброперемешивание утончает ТПС, что затрудняет активацию ЦП. Противоположным влиянием этих двух факторов объясняется характер зависимости $\Delta T_0(F)$ (рис. 22). При малых частотах и больших амплитудах ВВ определяющим фактором перехода от конвекции к кипению является уменьшение толщины ТПС, что приводит к исчезновению гистерезисных явлений. В области резонансных частот определяющую роль играют знакопеременные пульсации давления. При частотах существенно выше резонансных ни тот, ни другой механизм воздействия не оказывает существенного влияния на теплообмен.

Исследования теплообмена при кипении на ПМР в условиях ВВ жесткими индукторами колебаний подтвердили представления о существенной роли капиллярных эффектов. Наиболее значительное влияние наблюдаются при совпадении частот $f=F$ в режиме "единичного" центра на поверхностях с $Rz < Rz_{пр}$. С ростом q (участки II, III кривой $\alpha(q)$) интенсифицирующее воздействие ВВ на теплообмен, как и в случае "обращенной" ПМР уменьшается. Это обусловлено тем, что ПП малого размера, действующие на границе ПМР в этих режимах затрудняют подток жидкости по КС микрошероховатости к границе сухого пятна. Обнаружено, что степень интенсификации теплообмена зависит от шероховатости поверхности. Поэтому на основании зависимости (14) было получено рас-

четное соотношение, позволяющее учесть воздействие вибрации на теплообмен при кипении на протяженных поверхностях и ПМР с $Rz < Rz_{пр}$.

$$Nu_B = Nu \left[\left(3 - 2 \frac{V_B - V_r}{V_B} \right) \frac{Rz}{Rz_{пр}} \left(\frac{\delta_B}{\delta} \right)^{0,6} \right]^{0,27}$$

Установлено, что механизм теплообмена в условиях ВВ зависит от соотношения размеров индуктора, и рабочей камеры. В случае когда их размеры близки помимо динамической составляющей давления в системе появляется дополнительное статическое давление величина которого зависит от формы индуктора, что позволяет расширить область управления теплоотдачей при кипении.

Заключение. В диссертации изложены результаты исследования механизма и интегральных характеристик кипения в условиях определяющего влияния размеров и шероховатости поверхности на процесс. Изучение этих вопросов преследует цель интенсифицировать теплообмен при одновременном сохранении требуемого уровня температур поверхности теплообмена.

1. Предложена новая физическая модель роста парового пузыря после испарения микрослоя в основании ПП, позволяющая объяснить особенности кипения жидкости на ПМР и механизм влияния шероховатости на процесс теплообмена. Отличительной особенностью модели является представление шероховатости поверхности в виде открытых капиллярных каналов, размеры которых определяются обработкой поверхности, а испарение жидкости в ПП происходит на границе сухого пятна в его основании.

2. Впервые экспериментально изучено влияние размеров поверхности нагрева на теплообмен при кипении в диапазоне тепловых потоков от начала генерации ПП до существования стабильной паровой пленки. Установлено, что отличия вида кривой $\alpha(q)$ при кипении на ПМР и протяженной поверхности обусловлены условиями формирования теплового пограничного слоя. Характерные участки кривой $\alpha(q)$ на ПМР обусловлены работой одиночного и ансамбля ПП, предельным насыщением поверхности ПП, образованием на поверхности неустойчивой и стабильной паровой пленки.

3. Установлено, что интенсивность теплоотдачи в условиях ПМР зависит от соотношения характерного размера ПМР и растущего на ней ПП. При этом предельный уровень интенсификации $\alpha_{max} = 2\alpha$ достигается при выполнении условия $25 < Ja(Pr/Bo)^{0,5} < 60$. Предложены зависимости для определения ΔT_o , α и $q_{кр}$ при кипении на

ПМР. Показано, что размеры поверхности оказывают влияние на теплообмен при кипении в случае $0,1 < Bo^{0,5} < 10$.

4. Обнаружено, что влияние шероховатости поверхности на теплообмен проявляется через изменения внутренних характеристик ПП. На основании предложенной модели и представлений об определяющем влиянии скорости роста ПП на интегральные характеристики кипения предложены зависимости для расчета α и $q_{кр}$ при кипении на поверхностях с $Rz < Rz_{пр}$.

5. Выявленное экспериментальное исследование теплообмена на ПМР с сетчатым КПП подтвердило представления об определяющем влиянии условий формирования теплового пограничного слоя на величину ΔT_0 . Установлено, что на ПМР, в отличие от протяженных поверхностей, наблюдается интенсификация теплоотдачи, обусловленная увеличением доли поверхности с которой происходит отбор энергии в растущий паровой пузырь.

6. Предложены зависимости для определения ΔT_0^0 , α^0 , $q_{кр}^0$ при кипении на ПМР с сетчатым КПП. Установлен механизм влияния КПП на теплообмен - изолирующее влияние проволочек основы сетки и рост капиллярных напоров в основании растущего ПП - предложены соотношения для их учета, вошедшие в обобщающие зависимости. Определены оптимальные характеристики сетчатого КПП, справедливые для случая кипения на протяженной поверхности.

7. Обнаружено, что процесс парообразования при капиллярной подпитке структуры отличен от кипения в большом объеме. Основные отличия заключаются в: -независимости процесса парообразования от шероховатости поверхности; -различной величине и характере пульсаций температуры поверхности под ПП и мениском; -ином характере накипобразования.

8. Впервые экспериментально исследован теплообмен при кипении в условиях вибрационного перемешивания жидкости независимыми жесткими индукторами колебаний, имеющими внутреннюю полость. Установлено, что наиболее значительное воздействие на теплообмен при кипении на ПМР наблюдается при совпадении частот вибровоздействия и генерации паровых пузырей. Обнаружено существование резонансных эффектов в системе "жидкость-пар" в отсутствии колебаний и автоколебаний поверхности нагрева. Исследовано воздействие сжимаемого объема (паровой фазы) в полости индуктора на его рабочие характеристики.

Впервые обнаружена возможность управления теплоотдачей при кипении на поверхностях с $Rz < Rz_{пр}$ за счет целенаправлен-

ного изменения частоты вибровоздействия. Показано, что изменение величины α при кипении в условиях вибровоздействия связано с ростом капиллярных напоров (низкочастотный капиллярный эффект) в микроструктуре поверхности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах.

1. Some peculiarities of vaporization process in a singl cell of heat pipe wick/Tolubinsky V.I., Antonenko V.A., Kudritsky G.R., Ostrovsky Yu.N., Kriveshko A.A.//Advenses in Heat Pipe Technology.-London.: Pergamon Press Inc.-1981, P.375-388.

2. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Островский Ю.Н. Особенности процесса кипения жидкости на поверхности малого размера//Пром.теплотехника.-1984.-т.6, №1.- С.3-9.

3. Кудрицкий Г.Р. Интенсивность теплоотдачи и критические плотности теплового потока при кипении жидкости на поверхности малого размера//Теплообмен и теплофизические свойства веществ.-Киев:Наук.думка.- 1984.- С.38-42.

4. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Островский Ю.Н. О механизме процесса кипения жидкости на затопленной поверхности с сетчатым капиллярно-пористым покрытием//Пром.теплотехника.- 1984.- т.6, №3.- С.3 -II.

5. Кудрицкий Г.Р. Кризис теплоотдачи при кипении на поверхностях с капиллярно-пористым покрытием//Конвективный теплообмен и гидродинамика.- Киев:Наук.думка.- 1985.- С.26-40.

6. Кудрицкий Г.Р. Экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении на микроповерхностях с сетчатым капиллярно-пористым покрытием и их обобщение//Теплофизические исследования элементов энергетических установок.-Киев:Наук.думка.-1986.-С.18-22.

7. Кудрицкий Г.Р., Иваненко Г.В. Обобщение опытных данных по критическим тепловым потокам на поверхностях с сетчатым капиллярнопористым покрытием//Теплофизические исследования элементов энергетических установок.-Киев:Наук.думка.-1985.-С.77-79.

8. Kudritsky G.R. Heat Transfer intensetl and critical Heat flux in boiling on Microsurface.//Heat Transf.Soviet Res.-1986.- v.18, №3.-P.65 - 70.

9. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Островский Ю.Н. Повышение эффективности теплообменной поверхности при испарительном охлаждении электронных приборов//Вопросы радиоэлектроники (сер.ТРТ0).-1986.-вып.4.- С.101-109.

10. Tolubinsky V.I., Antonenko V.A., Ivanenko G.V., Kudritsky G.R. Critical phenomena in Thermosiphons with a wick covered evapo-

- rator wall//Heat Transf.Soviet Res.-1988.-v.20,N4.-P.480-483.
- II.Толубинский В.И.,Антоненко В.А.,Кудрицкий Г.Р.,Чистяков Ю.Г. Влияние вибрационного воздействия на теплообмен в энерготехнологических устройствах//Пром.теплотехника.-т.II,N3.-С.3-7.
- 12.Толубинский В.И., Антоненко В.А., Иваненко Г.В., Кудрицкий Г.Р. Теплообмен при кипении на поверхности с тонким сетчатым покрытием//Пром.теплотехника.-1989.- т.II,N4.- С.3-7.
- 13.Кудрицкий Г.Р.,Островский Ю.Н.,Антоненко В.А. Исследование механизма парообразования в сетчатых фитилях низкотемпературных тепловых труб//Пром.теплотехника.-1990.-т.I2,N1.-С.12-16.
14. Антоненко В.А., Чистяков Ю.Г., Кудрицкий Г.Р. Особенности теплообмена при кипении в условиях вибровоздействия на жидкость//Пром.теплотехника.-1990.-т.I2,N4.- С.61-65.
- 15.Антоненко В.А.,Голенко А.Ф.,Кудрицкий Г.Р.,Островский Ю.Н. Влияние пористого покрытия на отрывной диаметр паровых пузырей//Пром.теплотехника.-1990.- т.I2, N5.-С.12 - 17.
- 16.Антоненко В.А.,Кудрицкий Г.Р. Определение критической тепловой нагрузки при кипении жидкости на затопленной поверхности с сетчатым покрытием// Инж.-физ.журн.-1990.- т.59, N2.- с.317. (Деп.ВИНТИ №1640 - В90).
- 17.Антоненко В.А.,Кудрицкий Г.Р. Результаты исследования механизма процесса парообразования применительно к фитилям тепловых труб//Инж.- физ.журн.-1991.-т.90,N1.-С.12-19.
- 18.Кудрицкий Г.Р.,Криволапов И.А.,Чистяков Ю.Г. Исследование характеристик цилиндрического индуктора колебаний применительно к кипению в условиях вибровоздействия на теплоноситель// Пром.теплотехника.-1993.-т.I5, N4.-С.49-51.
- 19.Кудрицкий Г.Р.,Коломиец Е.А. Влияние геометрических характеристик поверхности на теплообмен и начало кипения//Пром.теплотехника.-1994.-т.I6,N1.-С.18-21.

Авторские свидетельства.

- 1.А.с.№941849. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И.,Антоненко В.А.,Кудрицкий Г.Р.,Островский Ю.Н.(СССР)-1982.
- 2.А.с.№953426. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И.,Антоненко В.А.,Кудрицкий Г.Р.,Островский Ю.Н.(СССР).-1982.
- 3.А.с.№985705. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И.,Антоненко В.А.,Кудрицкий Г.Р.,Островский Ю.Н.(СССР).-1982.
- 4.А.с.№1015239. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И.,Антоненко В.А.,Кудрицкий Г.Р.,Островский Ю.Н.(СССР).-1983.
- 5.А.с.№1170261. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И.,Ан-

- Тоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Островский Ю.Н. (СССР). - 1985.
 6.А.с. №1250831. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И., Ан-
 тоненко В.А., Иваненко Г.В., Кудрицкий Г.Р. (СССР). - 1985.
 7.А.с. №1250833. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И., Ан-
 тоненко В.А., Кудрицкий Г.Р. (СССР). - 1986.
 8.А.с. №1322071. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И., Ан-
 тоненко В.А., Иваненко Г.В., Кудрицкий Г.Р. (СССР). - 1987.
 9.А.с. №1384915. Теплообменная поверхность/Толубинский В.И., Ан-
 тоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Кудрицкая Л.В. (СССР). - 1988.
 10.А.с. №1464028. Тепловая труба/Толубинский В.И., Антоненко В.А.
 Кудрицкий Г.Р., Кудрицкая Л.В. (СССР). - 1988.
 11.А.с. №268485/ Антоненко В.А., Атамась А.В., Кудрицкий Г.Р., Чи-
 стяков Ю.Г., Малышев В.С. (СССР). - 1988.
 12.А.с. №271401/ Антоненко В.А., Атамась А.В., Кудрицкий Г.Р., Ос-
 тапенко А.В., Чистяков Ю.Г. (СССР). - 1988.
 13.А.с. №285914/ Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Чистяков Ю.Г.
 (СССР). - 1989.
 14.А.с. №292387/ Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Островский Ю.Н.,
 Чистяков Ю.Г. (СССР). - 1989.
 15.А.с. №291386/ Антоненко В.А., Атамась А.В., Кудрицкий Г.Р.,
 Чистяков Ю.Г. (СССР). - 1989.
 16.А.с. №305959/ Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Островский Ю.Н.,
 Чистяков Ю.Г. (СССР). - 1990.
 17.А.с. №312163/ Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Чистяков Ю.Г.
 (СССР). - 1990.
 18.А.с. №1673822. Тепловая труба/Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р.,
 Кудрицкая Л.В., Чистяков Ю.Г. (СССР). - 1991.
 19.А.с. №1678827. Парогенератор и способ работы парогенератора/
 Антоненко В.А., Кудрицкий Г.Р., Кудрицкая Л.В., Чистяков Ю.Г.
 (СССР). - 1991.

Условные обозначения

A_t - амплитуда пульсаций температуры поверхности нагрева; a - ра-
 змер ячейки пористой структуры в свету; α - коэффициент темпе-
 ратуропроводности; d - диаметр проволоки основы сетки; D_o - отры-
 вной диаметр парового пузыря; f - частота образования пузырей;
 F - частота вибровоздействия; g - ускорение силы тяжести; h - тол-
 щина сетчатого покрытия; H - высота уровня жидкости (капилляр-
 ное поднятие); n - число слоев сетки (кроме оговоренных случаев);
 N - число канавок; P - давление; r - теплота парообразования; R - ра-
 диус; ΔT - температурный напор; q - плотность теплового потока; α -

коэффициент теплоотдачи; ρ -плотность; δ -толщина пленки; σ -коэффициент поверхностного натяжения; θ -краевой угол смачивания; τ -время; μ -коэффициент динамической вязкости; индексы: о-начало кипения; о-стенка (нижний), структура (верхний); кр-критический; п-пар; ж-жидкость; км-контакт; пр-пределный; м-поверхность малого размера; кап-капиллярность.

Аннотация

G.R.Kudritsky. Boiling heat Transfer in conditions of determining influence of heating surface geometry (manuscript).

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences by speciality 05.14.06 - Technical thermophysics, physics, Institute of Technical Thermophysics of National Academy of Sciences of the Ukraine, Kiev, 1995.

Model of vapor bubble growth after microlayer evaporation that explains influence of roughness and size of surface on boiling heat transfer is defended. Correlations which define intensity and crisis of heat transfer, boiling incipience superheating for surfaces with net cover and with out in conditions of determining influence of surface micro- and macrogeometry and experimental data on which those are based are given. New effects in boiling with mixing of fluid by vibration are obtained. Methods of intensification and control of boiling heat transfer are proposed.

Кудрицкий Г.Р. Теплообмен при кипении в условиях определяющего влияния геометрии поверхности нагрева (рук.).

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.06-Техническая теплофизика, Ин-т технической теплофизики НАН Украины, Киев, 1995.

Защищается модель роста парового пузыря после испарения микрослоя, объясняющая влияние шероховатости и размеров поверхности на теплообмен при кипении. Зависимости для определения интенсивности и кризиса теплоотдачи, перегревов начала кипения на поверхностях с сетчатым покрытием и без него в условиях определяющего влияния микро- и макрогеометрии поверхности и обосновывающие их экспериментальные данные. Новые эффекты при кипении в условиях виброперемешивания теплоносителя. Предложены методы интенсификации и управления теплообменом при кипении.

Ключевые слова: Теплообмін, кипіння, мікро-і макрогеометрія, поверхня малого розміру, криза тепловіддачі, капілярно-пористе покриття, вібрація, коливання, індуктор, частота.

Подписано к печати 4.07.1995 г. Формат 60х84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.2,0.Уч.-изд.лист 2,0.
Тираж 100. Заказ 317.

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

08.5287

AB 32.800

U54411

AB 32.801

AB 32.801